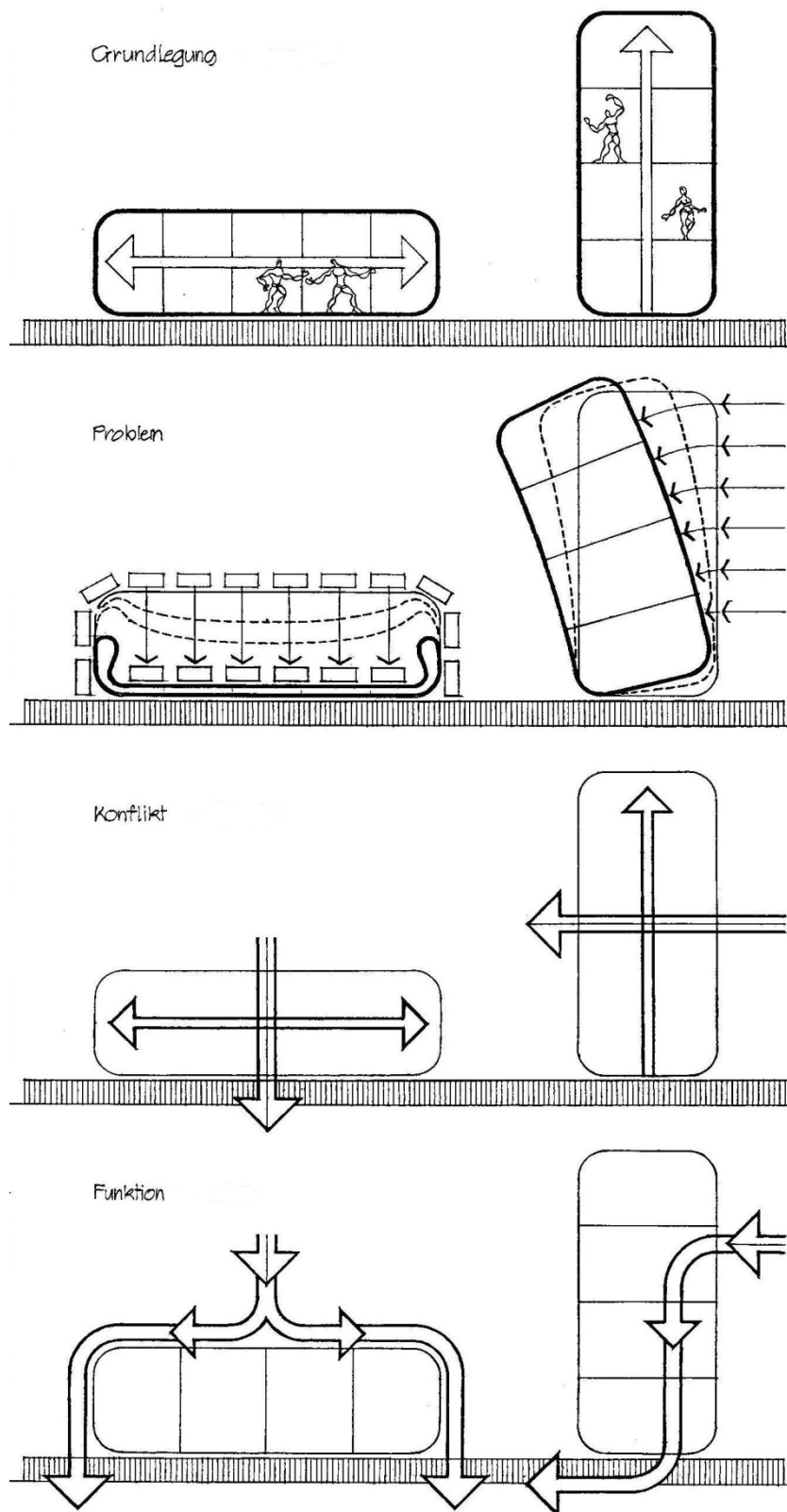


# dat „dat blows up“ statische grundlagen pneu

Warum wir Tragwerke überhaupt bauen?

*Wir Menschen haben das Bedürfnis nach geschütztem Bewegungs-/Tätigkeitsraum*

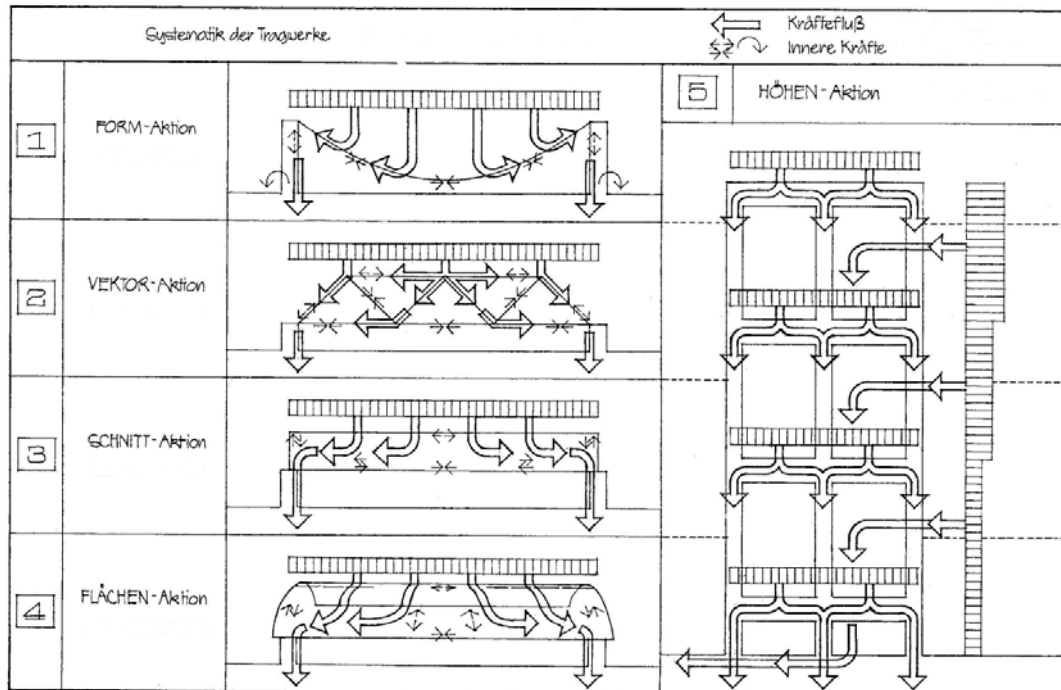


# Gleichgewicht der Kräfte

Aufgabe von Tragwerken ist es, das **Gleichgewicht der Kräfte** herzustellen. *h. eine Konstruktion zu entwerfen (bzw. zu dimensionieren), die den angreifenden Kräften widersteht = Gegenkräfte mobilisiert, die zum Gleichgewicht der Kräfte führen.*

Tragsysteme dienen dem **kontrollierten Kräftefluss** – d.h.

**Lastaufnahme → Lastableitung → Lastabgabe**



- **KRAFT** = ist eine Größe, die einen Körper dazu bringt, sich zu bewegen oder seine Form zu verändern
- **WIDERSTAND** = ist die Kraft, mit der sich ein Körper gegen Bewegung oder Verformung durch eine äußere Kraft widersetzt (= Gegenkraft)
- **GLEICHGEWICHT** = ist der Zustand, in dem alle auf einen Körper einwirkenden Kräfte zu keiner Bewegung oder Verformung führen. (Ausgleich von Inneren und Äußeren Kräften)
- **INNERE KRÄFTE** = Spannungen, Widerstände
- **ÄUSSERE KRÄFTE** = Eigengewicht, Windlasten, Schneelasten, Erddruck, Nutzlasten, ...

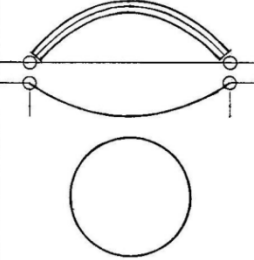
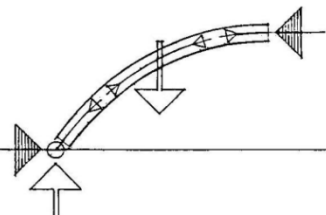
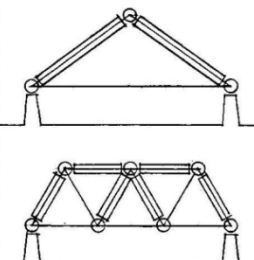
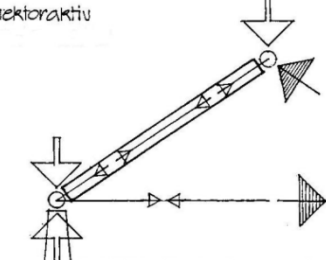
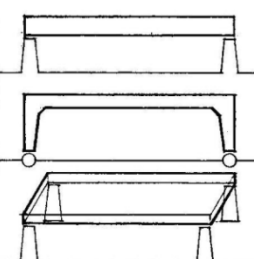
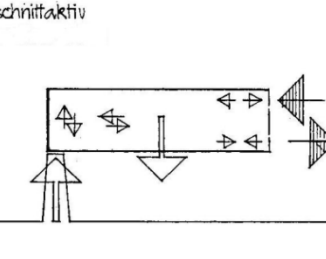
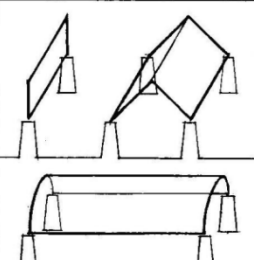
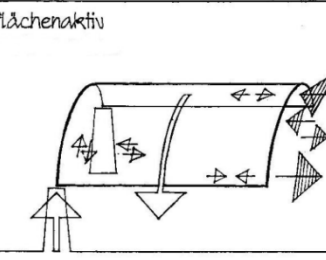
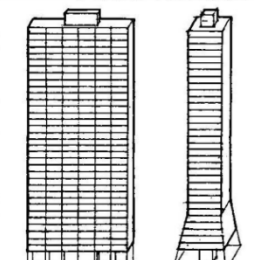
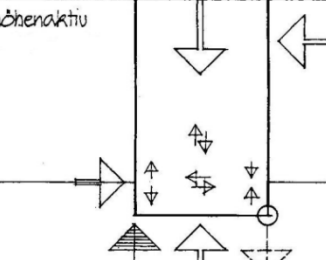
## BELASTUNGSARTEN:

- Druckkräfte
- Zugkräfte
- Schubkräfte
- Scherkräfte
- Torsionskräfte
- Biegekräfte

# Mechanismen zur Beherrschung der Kraftflüsse

Mensch und Natur haben Mechanismen entwickelt, um äußere Kräfte durch Tragwerke zu beherrschen:

- **Anpassung** an die Kräfte - **formaktiv**
- **Aufspaltung** der Kräfte - **vektoraktiv**
- **Zerstreuung** der Kräfte - **flächenaktiv**
- **Einsperrung** der Kräfte - (quer) **schnittaktiv**

Kriterium	Prototyp	Kräfte	Merkmal	Mechanik der Kraftumlenkung
1 FORM	 <p>Stützboogen Hängeseil Kreisring Ballon</p>	Druck oder Zug	Stützlinie  Kettenlinie  Kreis circle	formaktiv  
2 VEKTOR	 <p>Dreieckskinder  Fachwerkträger</p>	Druck und Zug	Dreieck- verband	vektoraktiv  
3 QUER- SCHNITT	 <p>Balken Rahmen Platte</p>	Biegung Schnittkräfte	Querschnitt- profil	schnittaktiv  
4 FLÄCHE	 <p>Scheibe gefaltete Platte Zylinderschale</p>	Membran- kräfte	Flächen- form	flächenaktiv  
5 HÖHE	 <p>Scheibe Turm</p>	(Komplexe Be- dingungen)	Lasten- Erdung Stabili- sierung	höhenaktiv  

# Formaktive Systeme

## Charakteristika Formaktiver Tragwerke:

- Anpassung an die Kräfte durch **weiche, flexible Baustoffe** mit **festen Endpunkten**.
- Umlenkung der Lasten passiert direkt über **einfache Normalkräfte** (Zug, Druck)
- Die Form dieser Tragsysteme entspricht dem „**natürlichen**“ **Kräfteverlauf** – Unmöglichkeit freier Formgebung. Die Bau- und Raumformen sind Ergebnis der Tragmechanik.

Formaktive Tragsysteme sind Konstruktionen aus flexibler, nicht steifer Materie, in denen die Kraftumlenkung durch geeignete Formgebung und charakteristische Formstabilisierung erfolgt. Der Tragmechanismus beruht vorwiegend auf stofflicher Form. Die Strukturform entspricht im Idealfall genau dem Kräfteverlauf.

Die „natürliche“ Kräftelinie des **formaktiven Drucksystems** ist die **Stützzlinie**,  
des **formaktiven Zugsystems** die **Hängelinie** (Kettenlinie).

Sie lenken äußere Kräfte durch einfache Normalkräfte (Druck, Zug) um und sind somit Systeme in einfachen Spannungszuständen (Druck, Zug).

Formaktive Tragsysteme entwickeln an ihren Festpunkten horizontale Kräfte. Wegen dieser Übereinstimmung mit den natürlichen Kraftverläufen eignen sich formaktive Tragsysteme ausgezeichnet für große Spannweiten in der Raumüberspannung.

## Arten formaktiver Tragwerke:

Man unterscheidet **Seil** -, **Zelt** -, **Pneu** - und **Bogen** - Tragwerke

### 1.1.1 Seil-Tragwerke

Seil-Drucksysteme



Seil-Zugsysteme



Seil-Drucksysteme



Seil-Tragwerke



### 1.1.2 Pneu-Tragwerke

Pneu-Drucksysteme



Pneu-Zugsysteme

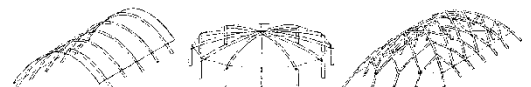


Pneu-Tragwerke



### 1.1.3 Bogen-Tragwerke

Bogen-Drucksysteme



Bogen-Zugsysteme



Bogen-Tragwerke



### 1.1.4 Zelt-Tragwerke

Zelt-Drucksysteme



Zelt-Zugsysteme



Zelt-Tragwerke

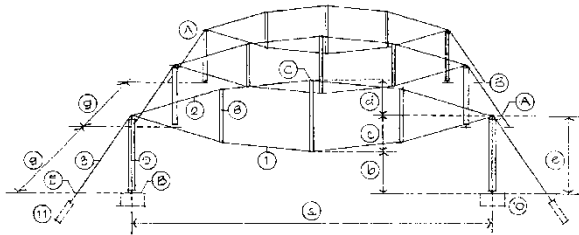


# Bauteile Formaktiver Tragwerke

Definition	FORMAKTIVE TRAGSYSTEME sind Tragssysteme aus flexiblen, nicht-stEIFER MaterIE, in denen die Kraftumlenkung durch geeignete FORMGEBUNG und durch charakteristische FORMSTABILISIERUNG erfolgt
Kräfte	Die Systemglieder werden dabei primär nur durch gleichartige Normalkräfte belastet, d.h. entweder auf Druck oder auf Zug; SYSTEME IN EINFACHEM SPANNUNGSZUSTAND
Merkmale	Die typischen Struktur-Merkmale sind: KETTENLINIE (HÄNGELINIE) / STÜTZLINIE / KREIS

## Bestandteile und Bezeichnungen

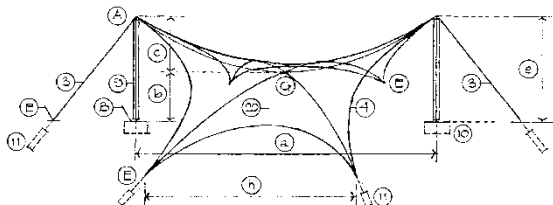
### 1.1 Seilsysteme



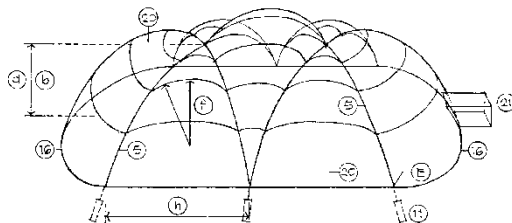
#### System-Glieder

- ① Tragsseil, Lastseil
- ② Stabilisierungseil, Spannseil
- ③ Rückhalteseil, Abspannseil, Stag
- ④ Randseil
- ⑤ Kehlseil
- ⑥ Fängeseil
- ⑦ Zugband, Zuganker
- ⑧ Druckstabe, Spreizstabe
- ⑨ Stütze, Fijor, Mast
- ⑩ Fundament, Gründung
- ⑪ Erdanker, Abspannanker
- ⑫ Widerlager
- ⑬ Gelenk
- ⑭ Scheitelpunkt
- ⑮ Fußgelenk, Kämpfergelenk
- ⑯ Ankerriem
- ⑰ Bogen, Stützboogen
- ⑱ Gelenkknoten
- ⑲ Strebe, Pfeiler
- ⑳ Tragmembran
- ㉑ Luftschleuse

### 1.2 Zeltsysteme



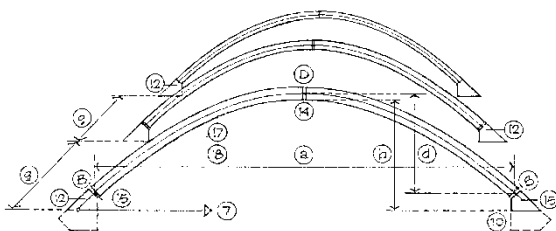
### 1.3 Pneusysteme



#### Topografische Systempunkte

- ① Aufhängepunkt
- ② Fußpunkt, Basispunkt
- ③ Hochpunkt
- ④ Scheitelpunkt
- ⑤ Ankerpunkt, Abspannpunkt
- ⑥ Auflagerpunkt
- ⑦ Tiefpunkt
- ⑧
- ⑨
- ⑩

### 1.4 Bogensysteme



#### Systemabmessungen

- ① Stützweite, Spannweite
- ② Lichte Höhe
- ③ Durchhang, Pfeilhöhe
- ④ Stich (-höhe), Pfeilhöhe
- ⑤ Stützenhöhe
- ⑥ Krümmungsradius
- ⑦ Binderabstand
- ⑧ Ankerpunkt-Abstand
- ⑨
- ⑩
- ⑪

# Pneumatische Systeme

## Pneu

Von Pneuma: [griechisch: „Hauch, Atem“]

Mz: Pneu

***Pneu bezeichnet alle zugfesten und gleichzeitig biegeweichen Hüllen, die gemeinsam mit einer gasförmigen Füllung ein konstruktives System bilden.***

***Auftretende Kräfte werden darin mit geringem Materialaufwand abgeleitet.***

## Pneumatik

= Teilgebiet der Mechanik, das sich mit dem Verhalten von Gasen beschäftigt

## pneumatisch

= luftgefüllt, mit Luftdruck betrieben, Luft (techn.)

## Pneumatische Tragwerke

= Tragwerke, Zählen zu den zugbeanspruchten Konstruktionen

Vorteile: Einfacher Transport durch geringe Tragwerksmasse

Kurze Bauzeiten durch leichte Montage und Demontage

Anwendungen: Überdachung von Sportanlagen (Fußball-, Tennis-, Reithallen), als Lagerhalle, Gewächshaus oder Radarstation, Bauwerke mit temporärer Nutzung (Werbe-, Ausstellungs-, Event-, Messebau)

# Luft

**Luft** ist ein Gas und hat eine Masse von 1,3 kg pro m<sup>3</sup>. Luft besitzt also Masse und benötigt darum auch Raum.

Im Gegensatz zu Flüssigkeiten lassen sich Gase aber zusammendrücken – komprimieren. Daraus ergeben sich nutzbare mechanische Eigenschaften. Dabei muss eine entsprechende Luftmenge von einer zugfesten und luftdichten Hülle eingeschlossen sein und der stabilisierende Innendruck muss dauerhaft und größer als alle von außen einwirkenden Kräfte sein.

Die Luft dient in pneumatischen Konstruktionen als tragendes Medium. Dabei beruht die Tragmechanik der Luft auf dem Widerstand der Pneu-Form gegenüber den äußeren Kräften (formaktiv). Die Luft ist hier ein aktiver Teil des Tragwerks.

## Luftdruck

Druck ist als Kraft pro Fläche definiert

**1 Pascal (Pa) = die Kraft von 1 Newton (N) auf eine Fläche von 1 m<sup>2</sup>**

Einheiten des Luftdrucks:

**Bar(bar) oder      Pascal (Pa)**

**1 bar                =        10 000 Pa**

Nachdem Gase (z.B. Luft), im Unterschied zu Flüssigkeiten und Festen Körpern, komprimierbar – zusammendrückbar sind, können Gase nun dichter oder weniger dicht sein.

Mit dem Luftdruck wird daher die **Dichtheit des Mediums Luft** beschrieben.

Druckunterschiede (**Druckdifferenz**) versucht die Natur automatisch auszugleichen, indem das Medium höherer Dichtheit in Richtung des Mediums niedriger Dichtheit strömt.

1 bar entspricht dem äußeren Luftdruck auf der Erdoberfläche.

Mit zunehmender Höhe verringert sich der Luftdruck - auf 5.500m Höhe ist der Luftdruck z.B. halbiert (0,5 bar/5.000 Pa).

Der Außen- bzw. Umgebungsdruck der Luft resultiert aus dem Eigengewicht der darüber liegenden „Luftsäule“. Auf Meereshöhe ist er am größten (ca. 10.000 Pa oder ca. 1 bar) und nimmt mit steigender Höhe ab.

Der Luftdruck wird mit **Barometer** und Manometer gemessen.

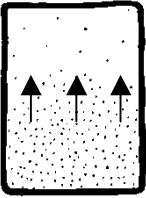
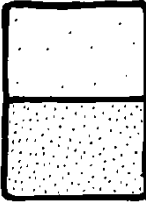
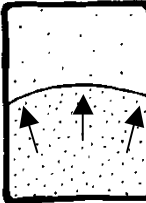
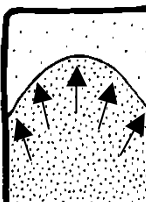
In Pneumatischen Konstruktionen wirkt die **Druckdifferenz** zwischen Innendruck und Außendruck als stabilisierend für die tragende Membranhülle. Pneumatische Konstruktionen sind luftgestützte Tragsysteme, entweder mit einem höheren Innenluftdruck (Überdruck) oder einem geringeren (Unterdruck) im Verhältnis zum Normaldruck.

Je nach Druckverhältnis unterscheidet man bei pneumatischen **Überdrucksystemen** Niederdruck- und Hochdrucksysteme. Zudem sind auch **Unterdrucksysteme** im Einsatz.

## Druckdifferenz

Gase (z.B. Luft) können zusammengedrückt – komprimiert werden und können dadurch unterschiedliche Druckzustände – Dichte – einnehmen (= **Luftdruck**).

Membran und Druckdifferenz:

	<p><b>keine Trennung der unterschiedlichen Dichtmassen</b></p> <p>dadurch ist ein freier Ausgleich des Druckunterschieds durch Strömung der Luft mit höherem in die mit niederem Druck möglich.</p>
	<p><b>feste Trennschicht zwischen den Dichtmassen</b></p> <p>Ein Druckausgleich ist nicht möglich - die Druckunterschiede bleiben erhalten.</p>
	<p><b>flexible Trennschicht (Membran) zwischen den Dichtmassen mit geringer Druckdifferenz</b></p> <p>Ein Druckausgleich ist nicht möglich - die Druckunterschiede bleiben erhalten. Allerdings wölbt der etwas höhere Druck die flexible Trennschicht leicht in Richtung niederen Druck.</p>
	<p><b>flexible Trennschicht zwischen den Dichtmassen mit hoher Druckdifferenz</b></p> <p>Ein Druckausgleich ist nicht möglich - die Druckunterschiede bleiben erhalten. Allerdings wölbt der stark höhere Druck die flexible Trennschicht weit in Richtung niederen Druck.</p>

Druckunterschiede (**Druckdifferenz**) versucht die Natur automatisch auszugleichen, indem das Medium höherer Dichte in Richtung des Mediums niederer Dichte strömt.

Trennt eine flexible Schicht (z.B. Membran) zwei Medien unterschiedlicher Dichte = unterschiedlichen Drucks, so wölbt das Medium mit höherem Druck die Schicht in Richtung des niederen Drucks aus. Je nach Größe des Druckunterschieds wölbt das dichtere Medium die Trennschicht (z.B. Membran) stärker oder weniger stark aus.

Die Trennschicht (Membran) wird durch den Druckunterschied in Form und Lage stabilisiert.

Pneumatische Konstruktionen sind **durch Druckdifferenz flächig stabilisierte Tragwerke**. Die Druckdifferenz ist dabei für die Tragfunktion erforderlich und somit als stabilisierendes Medium Bestandteil der Konstruktion.

Druckdifferenz zwischen dem durch die Membran getrennten Außen- und Innenluftdruck beträgt bei Pneumatikwerken durchschnittlich:

bei **Hochdrucksystemen**            **0,2 bis 7,0 bar**  
bei **Niederdrucksystemen**        **0,001 bis 0,01 bar.**

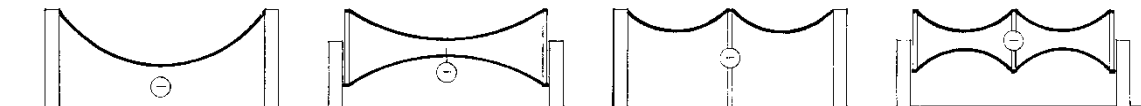
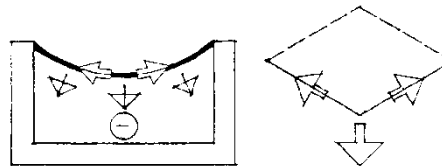
## Pneusysteme:

- 1) **Unterdruck-Systeme** sind keine Tragwerkstypen, sondern dienen der Stabilisierung von tragenden (Hänge-) Membranen. Die Luft kann hier nicht formbildend eingesetzt werden und muss als solche oft durch aufwendige Stützkonstruktionen ersetzt werden.
- 2) **Überdruck-Systeme** nutzen den erhöhten Luftdruck zur Formstabilisierung in Raumhüllen.
- 3) **Kombinationen Über- und Unterdrucksystemen**

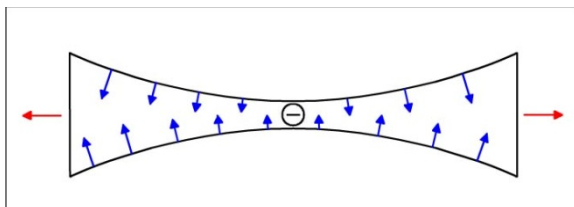
### 1) Unterdrucksysteme

= in einer geschlossenen Raumhülle wird **gegenüber der Umgebung** (Aussendruck) ein **geringerer Luftdruck** = Unterdruck (Innendruck) erzeugt.

Die Luft wird hier nicht aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften zur Raumbildung eingesetzt, sondern dient lediglich zur Stabilisierung von Hängemembranen. Daher benötigen diese Systeme auch zusätzlich Rahmen- und/oder Stützkonstruktionen und werden daher nicht als eigenständige Tragwerkssysteme bezeichnet.



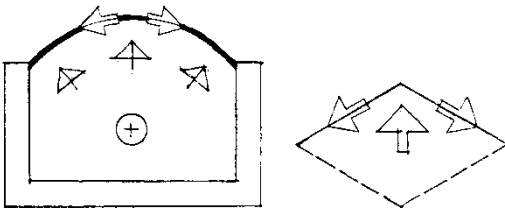
zeichnung engel s.102



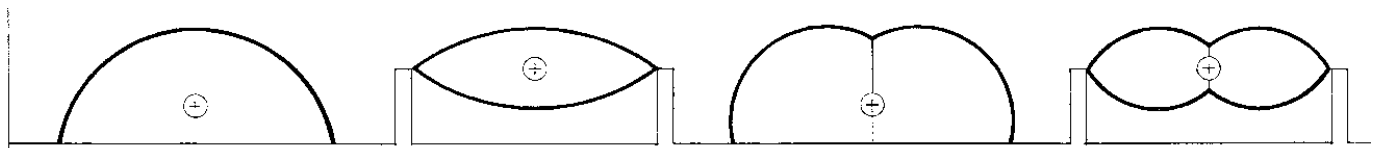
- Unterdruckpneus
- Niederdrucksystem
- Innendruck: -3 - -5 mbar
- Primärtragwerk erforderlich!

## 2) Überdrucksysteme

= in einer geschlossenen Raumhülle (Membran, Kissen, Schlauch) wird **gegenüber der Umgebung** (Aussendruck) ein **höherer Luftdruck** = Überdruck (Innendruck) erzeugt. Der Überdruck bewirkt mechanische Eigenschaften zur Ableitung von Kräften und kann so zur Stabilisierung als Konstruktionselement eingesetzt werden.

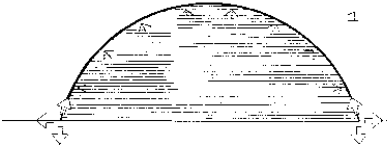
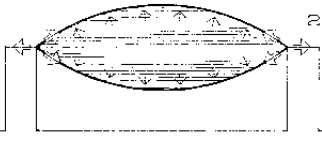
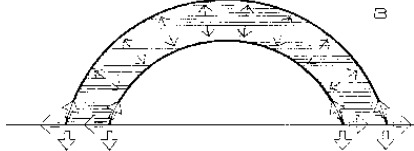


Man unterscheidet nach Höhe des Luftdrucks **Niederdrucksysteme** und **Hochdrucksysteme**.



zeichnung engel s.102

Man unterscheidet nach Art der Lufthülle zwischen **Lufthalle**, **Luftkissen** und **Luftschlauch**.

Lufthalle	Luftkissen	Luftschlauch
		

Zeichnung Engel S.102

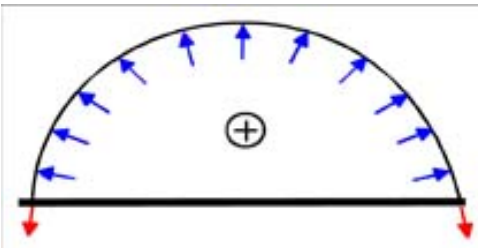
## 2) a) Lufthallen - Systeme

Durch Überdruck (Traglufthallen), Unterdruck oder beidem erzeugt  
= ein Innendrucksystem.

Der Luftüberdruck im umschlossenen Raum trägt die Raumhülle und stabilisiert sie gegen angreifende Kräfte. **Der Überdruckraum ist gleichzeitig Nutzraum.** Der Überdruck macht **Luftschleusen** für Ein-bzw. Ausgangsbereiche erforderlich, um einem Druckabfall im Inneren zu verhindern.

Lufthallen sind Niederdrucksysteme mit einem Innendruck von 3 – 5 mbar. Die Membrankräfte werden an den Rändern direkt abgegeben.

Der Überdruck wird in der Regel durch einen Kompressor erzeugt.



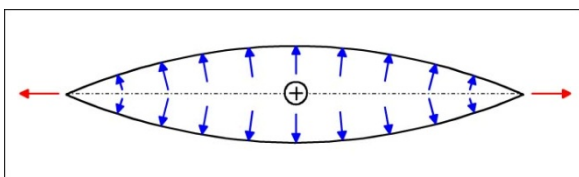
- *luftgestütztes Überdrucksystem*
- *Niederdrucksystem*
- *Innendruck: 3 - 5 mbar*
- *Lastaufnahme und Abtragung erfolgt durch permanenten Überdruck im gesamten Innenraum.*
- *Luftschleusen in Ein- und Ausgangsbereichen sind erforderlich.*
- *sehr großes Luftvolumen, das gesteuert werden muss.*

## 2) b) Luftkissen – Systeme

Durch Überdruck, Unterdruck oder beidem erzeugt  
= ein **Doppelmembransystem**

Der Luftüberdruck im Kissen dient nur zur Stabilisierung der Tragmembrane und bildet zusammen mit der oberen Membrane einen Druckkörper. Die **Aufnahme der Membrankräfte** an den Rändern **erfordert eine Rückhaltekonstruktion**.

Auch wenn die Herstellung von Luftkissensystemen technisch aufwendiger und kostenintensiver sind, liegen die Vorteile in der besseren Wärmedämmung und der einfacheren Ausführung der Eingangsbereiche ohne Druckschleuse.



- *Niederdrucksystem*
- *Innendruck: 3 - 5 mbar*
- *keine Luftschleusen erforderlich*
- *verhältnismäßig kleines zu steuerndes Luftvolumen*
- *ein Primärtragwerk (zusätzliche Unterstützung) ist erforderlich!*

## 2) c) Luftschlauch - Systeme

Als **selbsttragende Raumhülle** oder tragendes Skelett

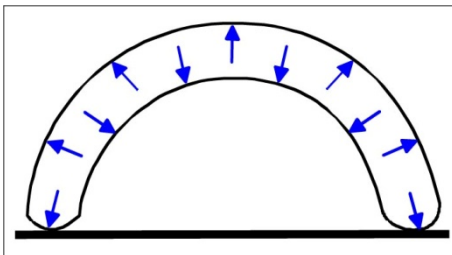
= ein Hochdrucksystem

Der Luftüberdruck stabilisiert die Schlauchform und bildet somit einen vorgespannten Luftkörper, der als tragendes Skelett für unterschiedliche raumabschließende Hüllen verwendet wird. Dies macht die Bildung pneumatischer Bögen, Säulen und Träger möglich.

*Zeichnung Mittag S.427*

Die Membrankräfte werden an den Rändern direkt abgegeben.

Der Innenraum des Tragwerkbaus weist keinen Überdruck auf, was eine bessere Nutzung und einfachere Konstruktion des Eingangsbereichs ermöglicht.



- *luftgestütztes Überdrucksystem*
- *Hochdrucksystem*
- *Innendruck beträgt 500 - 1 000 mbar*
- *lastaufnehmende und biegetragfähige Tragwerkselemente*
- *keine Luftschleusen erforderlich.*
- *verhältnismäßig klein zu steuerndes Luftvolumen*
- *die Addition mehrerer Schlauchelemente und anderer Elemente erzeugt das Primärtragwerk*

## Formbildung

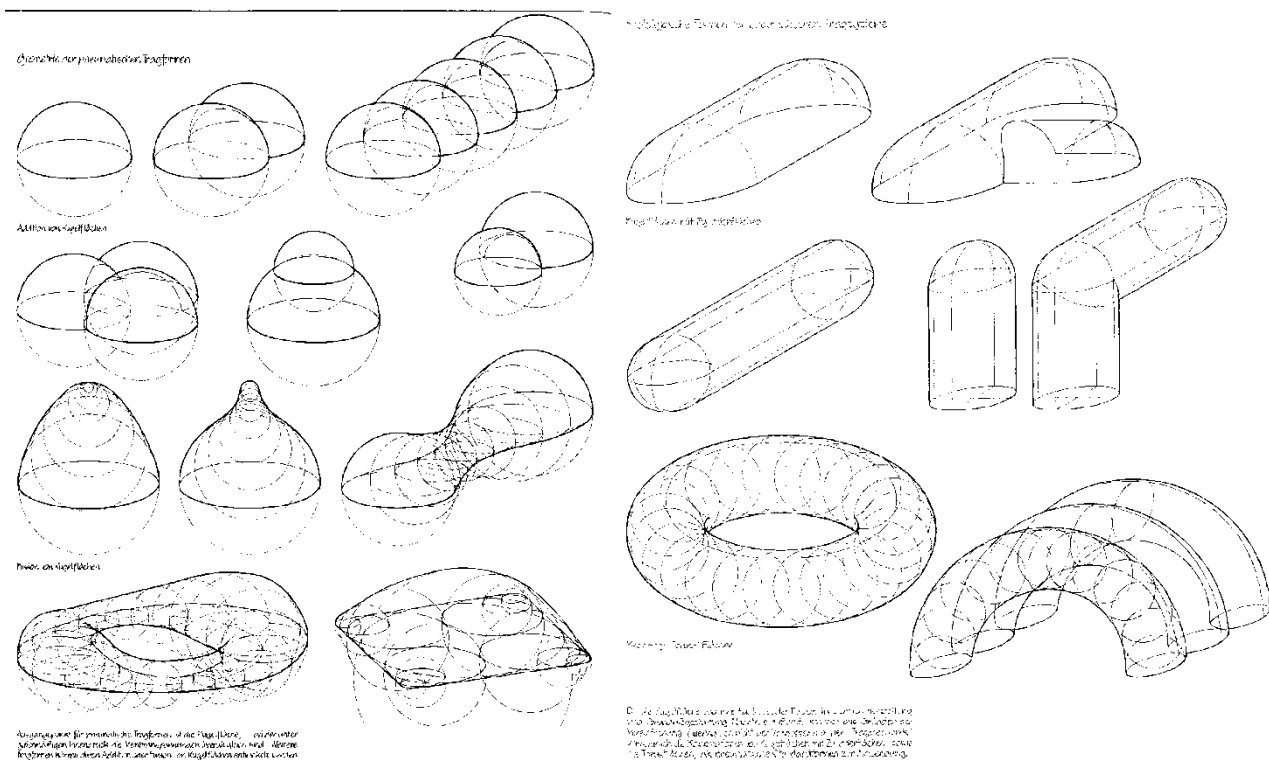
Die Kräfte eines eingeschlossenen Luftvolumens mit Überdruck sind überall gleich groß.

Sie wirken in Richtung der umgebenden Hülle – also in Richtung eines möglichen Druckausgleichs.

Die aus diesem Kräftezustand resultierende Membranform ist die Grundgeometrie pneumatischer Strukturen – KUGELFLÄCHEN.

Die Kugelfläche umschließt Raum mit minimaler Oberfläche.

Die Membran in Kugelform entwickelt an jeder Stelle die gleichen Zugspannungen und bildet somit die optimale Form. Pneumatischen Konstruktionen wird die Kugel als Ausgangsform grundgelegt.



## Spannungsharmonische Flächen:

Da Minimalflächenlösungen (Kugel) nur in wenigen Fällen den geforderten Nutzungsbedingungen entsprechen, müssen auch andere Formen gefunden werden.

Dabei werden spannungsharmonische Flächen gesucht, um die Hauptspannungen in der Membran möglichst klein zu halten und kontrolliert abzuleiten.

Dabei gilt es durch organische Formübergänge an den Schnittstellen von Teilflächen erhöhte Spannungssprünge zu verhindern.

## Formgesetze:

Um die Größe und Form der Membrane für den Zuschnitt optimal ermitteln zu können, werden unter anderem **Seifenhautmodelle**. Diese haben eine äußere und innere Flüssigkeitsoberfläche. Alle mit Seifenblasen herstellbaren Formen, sind ideale pneumatische Gebilde, da sie aufgrund der Fließfähigkeit ihrer Haut immer Formen bilden, die an **jeder Stelle der Oberfläche, in alle Richtungen, gleiche Membranspannung** aufweisen.

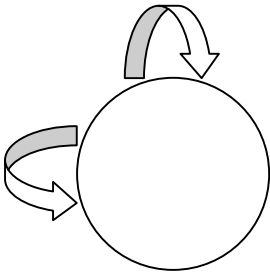
So bilden sich innerhalb bestimmter Randbedingungen immer die **größtmöglichen Volumina** und die **kleinstmöglichen Oberflächen**. Es entstehen sogenannte **Minimalflächen**.

### Minimalfläche

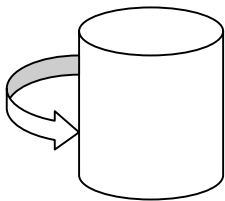
= bezeichnet das größtmögliche Volumen bei kleinstmöglicher Oberfläche.

Minimalflächen können durch Computerprogramme oder durch Analogmethoden (z.B. Seifenhautmodell) erstellt werden.

Schwebt eine Seifenblase frei im Raum, so ist sie an keine Randbedingungen gebunden – es bildet sich eine Kugelfläche als die einzige von Singularitäten freie, endliche Fläche konstanter Krümmung.



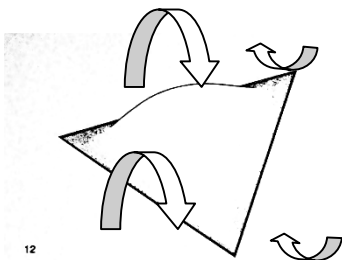
Die Krümmungsradien sind bei der Kugel **gleichsinnig doppelt gekrümmt** und werden als **synklastisch** bezeichnet.



Die Fläche eines Zylinders wird als **einfach gekrümmt** bezeichnet.

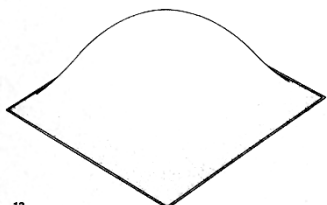


Schwimmt eine Seifenblase auf einer Flüssigkeitsoberfläche, so grenzt sie über eine Fläche an ein dichteres Medium. Die Blase bildet eine Halbkugel mit synklastisch (siehe Kugel oben) gekrümmter Form. Ihre Schnittfigur mit der Flüssigkeitsoberfläche bildet einen Kreis.



Durch die Einführung weiterer Randbedingungen lassen sich verschiedene Schnittfiguren erzeugen:

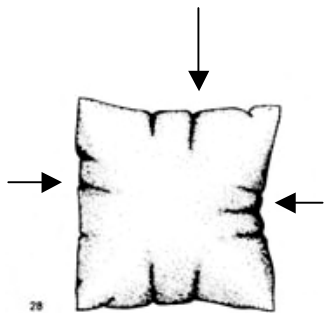
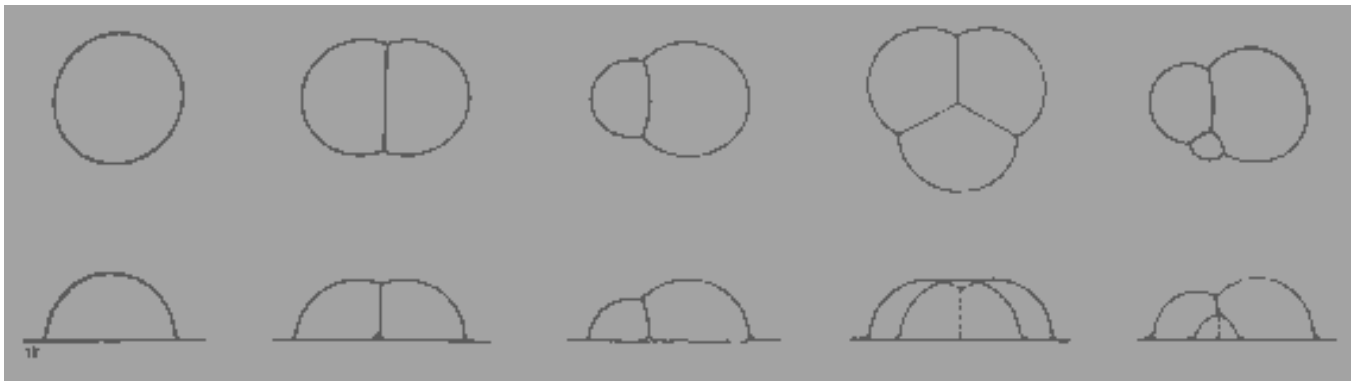
Beispielsweise mit einem drei- oder viereckigen Drahtrahmen:  
So bilden sich im Bereich der Ecken gegensinnig **doppelt gekrümmte** oder **antiklastische Flächen**, auch Sattelflächen genannt.  
So lassen sich unzählige Formen von pneumatisch gespannten Seifenhäuten finden.



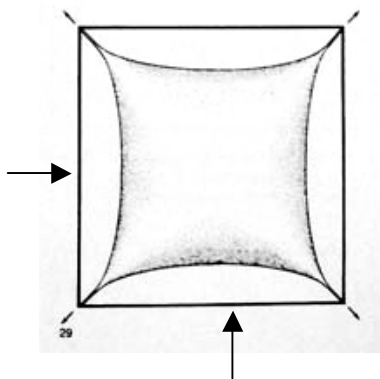
Eine Anhäufung mehrerer Blasen hat ebenfalls die Tendenz sich der Kugelform anzunähern. Bis zu vier zusammenhängende Blasen bilden, bei gleicher Größe und gleichen Innendruck, identische Kugelabschnitte, wobei alle Innenlamellen eben sind.

Sind die Blasen verschieden groß, so wölben sich die Innenlamellen jeweils in Richtung der relativ größeren Blase.

Hier eine Übersicht einfacher **Blasenkombinationen**:



Wo bei Seifenblasen Drahtgerüste zur Formerzeugung gebraucht werden, sind auch bei pneumatischen Gebilden aus nicht oder wenig elastischem Material, besondere Randbedingungen erforderlich. Die Spannungen an den verschiedenen Stellen der Membrane sind sonst so unterschiedlich, dass Falten entstehen.



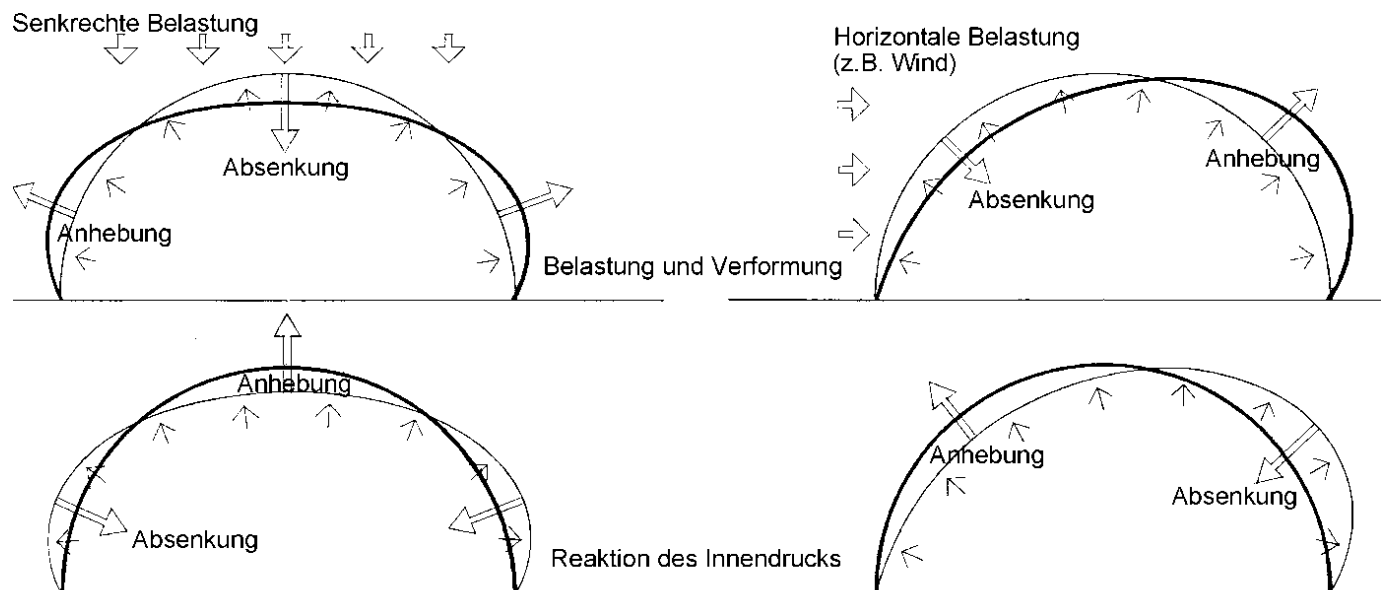
Beispielsweise will ein Gebilde mit quadratischer Grundform, die Gestalt einer Kugel annehmen. So ist in der Richtung quer zu den Falten keine Zugspannung vorhanden und es müssen zusätzliche Tragelemente eingeführt werden.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vgl. Herzog Thomas: „Pneumatische Konstruktionen“, S. 8 -14

## Verformungsverhalten

Pneumatische Konstruktionen können sich bei Krafteinwirkung aufgrund der Flexibilität von Luft (komprimierbar) und Membrane verformen. Bei Krafteinwirkung wird einerseits die Membran verformt (formaktiv) wodurch sich die Membranfläche vergrößert und andererseits Luftvolumina verschoben.

### *Membranbelastungen und Reaktionen des Innendrucks bei Verformung*



zeichnung engel s.99

Den Widerstand gegen Verformungen gewährleisten Luftdichtheit und Zugfestigkeit der Membrane.

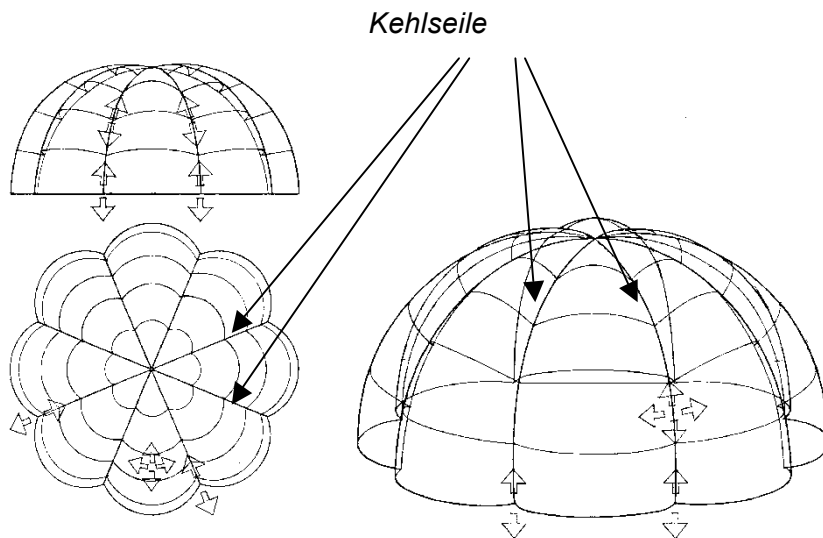
Widerstandsmechanismen gegen Verformung:

- die Membran versucht der Vergrößerung ihrer Fläche und der aufgetretenen Erhöhung ihrer Spannung entgegenzuwirken und ihre Minimalfläche wieder herzustellen.
- der Innendruck versucht von innen auf Einwölbungen der Membran mit Druck nach außen zu reagieren.

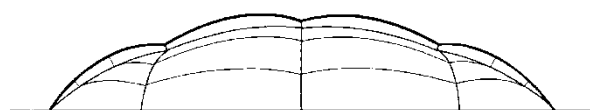
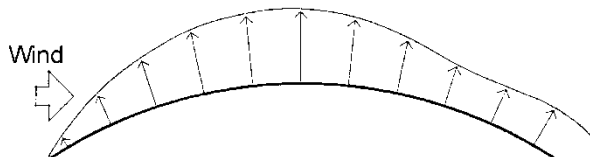
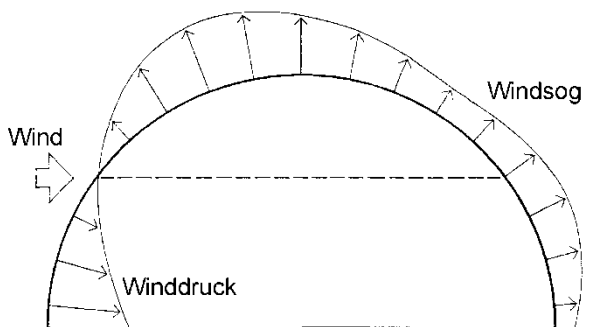
## Möglichkeiten zusätzlicher Stabilisierung:

### Abspannung

Mithilfe von Seilzügen (Kehlseilen) kann die Membranspannung verringert werden. Dabei übernehmen die Kehlseile einen Teil der Spannung und leiten sie über die Verankerung (Abspannanker/Erdanker) in den Boden ab.



Die Bauwerkform und **-höhe** (Pfeilhöhe) sind mitverantwortlich für das Auftreten von Windlasten:  
je niedriger ein Bauwerk, desto geringer die Windlast.  
je kleiner der Anströmwinkel, desto geringer (bei Pneus vor allem Druckbelastung).



# Membran

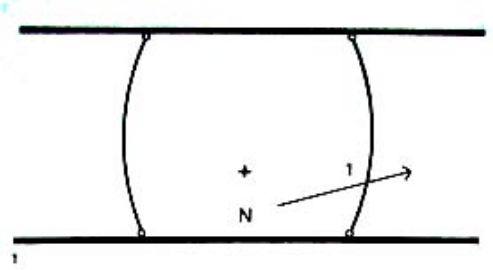
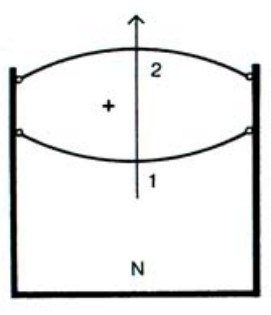
**die Membran und Membrane** [lateinisch: zarte, *dünne Haut*]<sup>2</sup>

bezeichnet eine biegeeweiche, lediglich zugbeanspruchbare Haut.

„Wird eine Membrane, [...], durch die Druckdifferenz gasförmiger Medien, im Normalfall Luft, gespannt, so entsteht ein pneumatisches Gebilde. [...]

Sie krümmt sich in Richtung des weniger dichten Mediums und wird dadurch flächig in ihrer Lage und Form stabilisiert.“<sup>3</sup>

Das pneumatische Tragwerk kann entweder als **Einfachmembrantragwerk**- oder als **Doppelmembrantragwerk** ausgebildet sein. Dies hängt von der Anzahl der Membranen zwischen Nutz- und Außenraum ab.<sup>4</sup>

<i>Einfachmembrantragwerk</i>	<i>Doppelmembrantragwerk</i>
 <p>N = Nutzraum</p>	
<p>Hier muss das <b>Stützmedium Luft</b> sein und eine für den Menschen <b>unschädliche Dichte</b> haben (vorwiegend Lufthallensysteme).</p>	<p>Hier kann <b>auch ein anderes Gas oder hochgradig komprimierte Luft</b> verwendet werden, da hier keine Menschen den Raum betreten (vorwiegend Luftkissen und Luftschlauchsysteme).</p>

## Membraneigenschaften

Membrane sollen bei **geringem Eigengewicht** eine **hohe Zugfestigkeit** und **Dehnsteifigkeit** aufweisen.

Wichtig ist außerdem die dauerhafte Beständigkeit gegenüber UV-Licht, Feuchtigkeit und Mikroorganismen.

Erweiterte Anforderungen können Transluzenz (die Durchdringung von Licht) und Brandverhalten/Feuerbeständigkeit sein.

<sup>2</sup> „Skript zum Seminar - Bubble gums“, S. 4

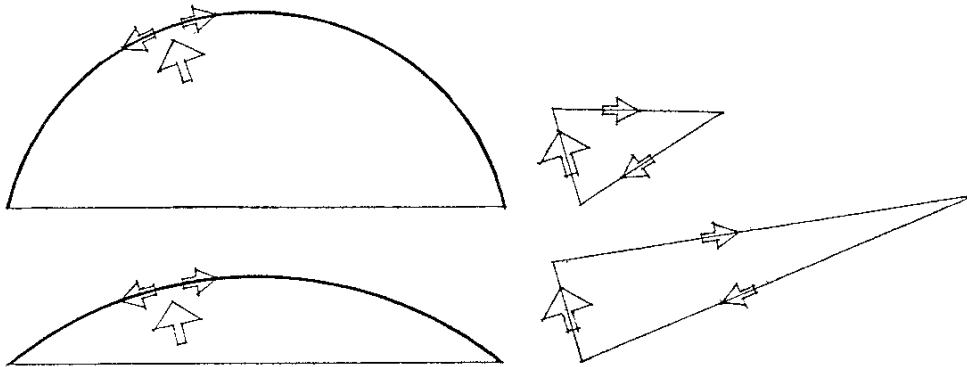
<sup>3</sup> Herzog Thomas: „Pneumatische Konstruktionen“, S. 8

<sup>4</sup> Vgl. Herzog Thomas: „Pneumatische Konstruktionen“, S. 8

## Membranspannung

Bezeichnet die Zugspannung innerhalb der Membran. Diese sollte möglichst gering gehalten werden.

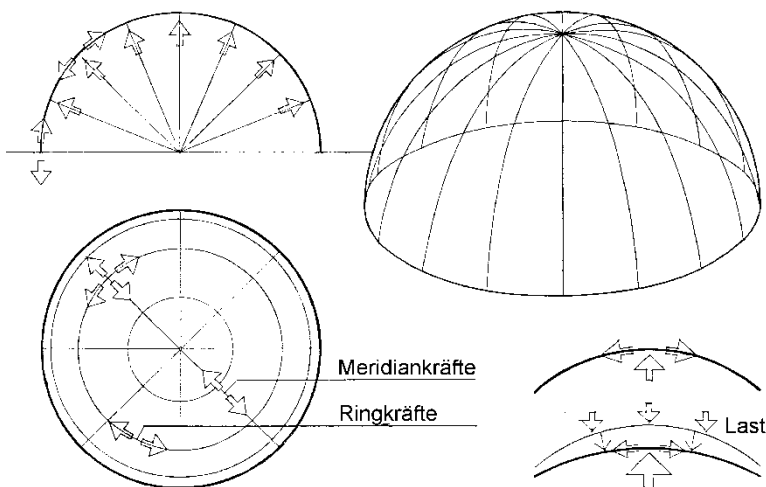
**Je größer der Krümmungsradius** (= meist große Spannweite) eines Tragwerks, **desto größer die Membranspannung**.



Bei größeren Überspannungsflächen würde die Belastung auf die Membran enorm ansteigen. Um dies zu verhindern wird versucht, den Membranradius durch Abspannungen (Überspannung/Unterspannung) zu verringern. Dadurch wird auch ein Großteil der Lastabtragung von der Abspannung übernommen (= primäres Element zur Lastabtragung).

*Zeichnungen Engel*

## **Meridian- und Ringkräfte**



Die Membranspannung wird berechnet nach der Formel

$$M = p \cdot r/2$$

M    *Membranspannung*  
p    *Innendruck*  
r    *Radius des Kugelpneus*

bedeutet:

die Membranspannung ist proportional dem Innendruck und dem Kreisradius

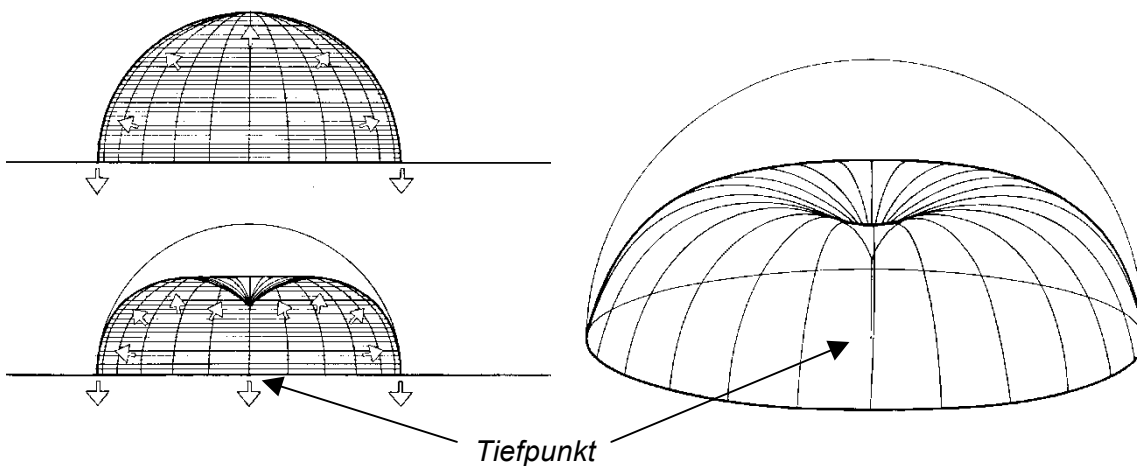
- je kleiner der Radius der dem Pneu eingeschriebenen Kugel ist, desto geringer ist bei gleichbleibendem Druck die Membranspannung oder:
- je größer der Radius ist, desto stärker muss der Innendruck sein, um die benötigte Membranvorspannung zu erhalten.

*Zeichnung Mittag S.426*

### Tiefpunkt

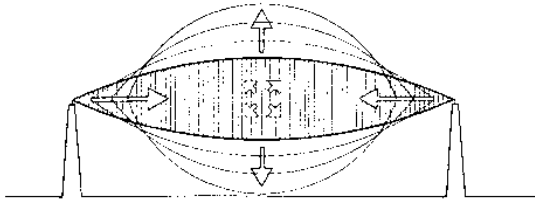
Abspannung der Membran bei Lufthallensystemen in mittleren Bereichen zur Verringerung der Membranspannung (Radiusverkleinerung). Dadurch wird die Überdeckung größerer Räume mit geringeren Konstruktionshöhen möglich.

*Zeichnung Engel S.104*



# Rückhaltesystem

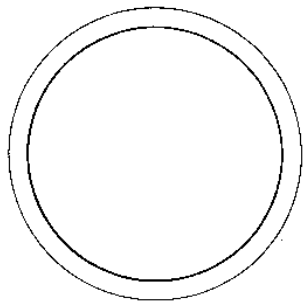
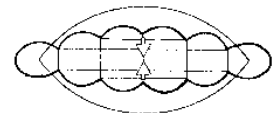
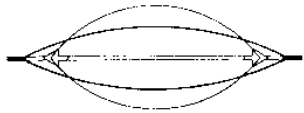
Rückhaltesysteme verhindern das kugelförmige Aufbauchen der Mitte infolge des hohen Innendrucks.



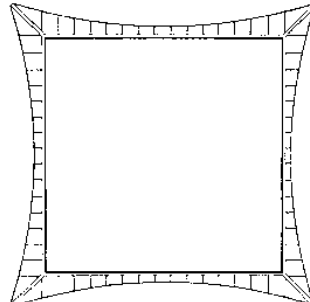
Rückhalte-Systeme der Luftkissen

Durch unteren Abschluß des Oberdruck-Raumtes mit zweiter Membran (statt Einbeziehung des Fußbodens) können Räume überspannt werden, die nach außen offen sind. Voraussetzung für die Tragmechanik ist, daß kugelförmiges Aufbauchen der Mitte infolge Innendruck verhindert wird.

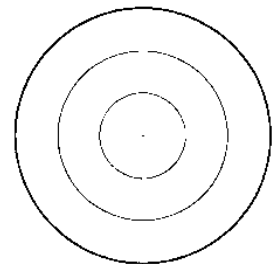
Rückhalte-Systeme der Luftkissen



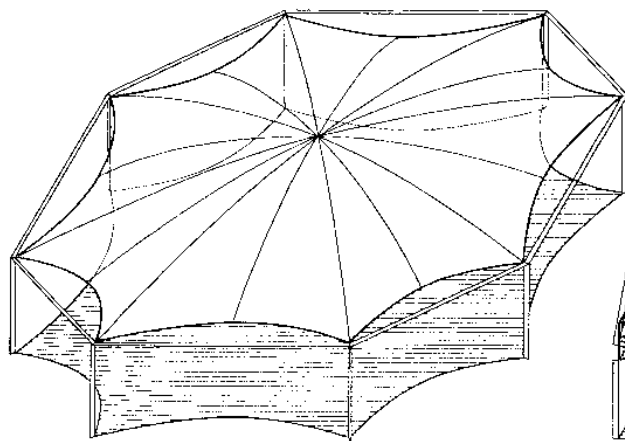
Rückhalte-Systeme der Luftkissen



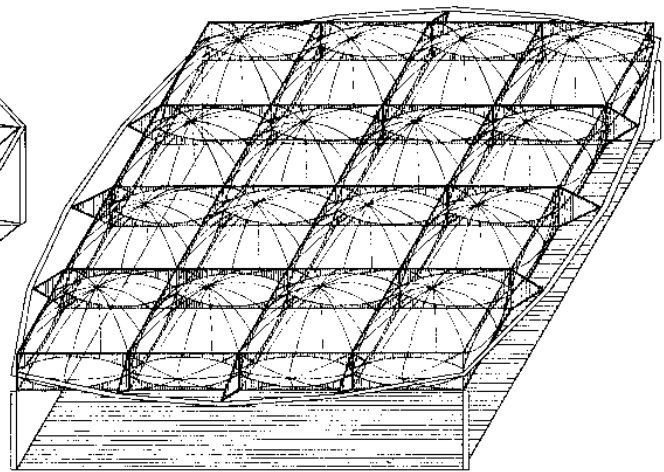
Rückhalte-Systeme der Luftkissen



Rückhalte-Systeme der Luftkissen



Einkammersystem mit Druckstabring als Rückhaltemechanismus



Mehrkammersystem mit Membranrippen und Druckbögen als Rückhaltemechanismus